

## 基于改进小波变换的MEMS陀螺信号去噪算法

陈光武\* 刘孝博 王迪 刘射德

(兰州交通大学自动控制研究所 兰州 730070)

(甘肃省高原交通信息工程及控制重点实验室 兰州 730070)

**摘要:** 为提高MEMS陀螺仪测量精度,抑制测量噪声对其造成的影响,该文分析了某型号MEMS陀螺仪误差特性,提出基于递归最小二乘法(RLS)多重小波分解重构的强迫跟踪自反馈模型,建立新的软阈值函数。由于模型处理后的数据带有部分奇异值,该文提出了一种改进的中值滤波算法。对于陀螺仪零偏噪声问题,提出零偏不稳定性抑制算法,并对该算法模型进行了详细的描述。将某项目研究中列车姿态测量系统的实验数据应用到该算法模型中。测试实验分为静态、动态两组,其结果均表明:该算法减小了信号中的噪声,有效地抑制了MEMS陀螺仪随机漂移,提高了姿态解算的精度。肯定了该算法对陀螺仪输出信号噪声去除,以及使用精度提升的可行性和有效性。  
**关键词:** MEMS陀螺仪;小波分解;姿态估计

中图分类号: U666.1; TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)05-1025-07

DOI: [10.11999/JEIT180590](https://doi.org/10.11999/JEIT180590)

## Denoising of MEMS Gyroscope Based on Improved Wavelet Transform

CHEN Guangwu LIU Xiaobo WANG Di LIU Shede

(Automatic Control Research Institute, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

(Gansu Provincial Key Laboratory of Traffic Information Engineering and Control, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In order to improve the measurement accuracy of Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) gyroscopes, the influence of measurement noise on them is suppressed. The error characteristics of a certain type of MEMS gyroscope are analyzed. A strong tracking self-feedback model based on Recursive Least Square (RLS) multiple wavelet decomposition reconstruction is proposed to establish a new soft threshold function. Since the model processed data has partial singular values, an improved median filtering algorithm is proposed. For the problem of gyro zero-bias noise, a zero-bias stability suppression algorithm is proposed. In this paper, the algorithm model is described in detail, and the experimental data of the train attitude measurement system in a project research are applied to the algorithm model. The test experiments are divided into static and dynamic groups. The results show that the algorithm reduces the noise in the signal, suppresses effectively the random drift of the MEMS gyroscope and improves the accuracy of the attitude calculation. The feasibility and effectiveness of this method are affirmed to remove the signal noise of the gyroscope output and improve the accuracy of the use.

**Key words:** MEMS gyroscope; Wavelet decomposition; Attitude estimation

收稿日期: 2018-06-13; 改回日期: 2018-12-25; 网络出版: 2019-01-04

\*通信作者: 陈光武 cgwyjh1976@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(61863024, 71761023)、甘肃省基础研究创新群体计划(1606RJIA327)、甘肃省自然科学基金(18JR3RA107, 1610RJYA034)、甘肃省高等学校科研项目资助(2018C-11)、甘肃省科技计划资助(18CX3ZA004)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61863024, 71761023), The Gansu Basic Research Innovation Group Program (1606RJIA327), The Gansu Natural Science Foundation (18JR3RA107 1610RJYA034), Granted by Gansu Provincial Higher Education Research Project (2018C-11), The Gansu Province Science and Technology Plan Funding (18CX3ZA004)

### 1 引言

基于微机电系统(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)的惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)具有低成本、小尺寸、低功耗等特点,因此在捷联惯性导航系统(Strapdown Inertial Navigation System, SINS)领域中得到了广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。在捷联惯导系统对准、姿态解算过程中,分辨率为几百( $^{\circ}$ /h)的陀螺会产生较大的非线性误差。在实际应用过程中,因为多种噪声源、杆臂效应、弹性变形等干扰的不确定性,使得对准、姿态解算更加复杂<sup>[3]</sup>。然而,把MEMS陀螺仪用在

一个没有恒定温度调整设备中的时候,温度变化会严重影响其精度<sup>[4]</sup>。MEMS陀螺仪中的噪声由两部分组成——低频分量和高频分量,且其均值为0。由于对温度变化极其敏感,因此周围温度的变化会导致陀螺数据发生漂移,使得角速率产生偏差,从而造成姿态角(航向角、俯仰角、横滚角)误差不断积累,这是低频分量噪声产生的主要影响<sup>[5]</sup>。文献<sup>[6]</sup>提出利用温度补偿来抑制温漂的方法有两种:第1种方法是利用温度控制系统保持MEMS陀螺仪周围温度的稳定。该方法有很高的精度并且能降低计算复杂度,但是成本大、功耗高、体积大、不宜安装;第2种方法是利用数字信号处理的方法来补偿温度漂移。

本文列举了当前MEMS陀螺仪温漂补偿的几种主流算法。Xiao等人<sup>[7]</sup>提出了一种全差分与集成参考电容器相结合的结构,利用其在全温范围内对温漂进行补偿。通过差分结构对信号(温度转成电压信号)的敏感性,再利用参考电容从硬件结构上实现信号的自转换。Igor等人<sup>[8]</sup>提出一种基于实时温度自感知的高品质因子( $q$ 因子)对MEMS陀螺仪长期偏置漂移的补偿算法。为减小误差补偿模型不准确带来的误差,提高容错能力,文献<sup>[9,10]</sup>将神经网络用于陀螺偏置温度补偿。Yuan等人<sup>[11]</sup>将MEMS陀螺仪速率信号分别用直接KF建模和差分KF建模处理,最后将两者动态特性进行比较,并得出直接估计KF模型精度更高的结论。Zha等人<sup>[12]</sup>将IUKF与模糊算法结合来提高补偿精度。KF, EKF, UKF在导航系统中是最普遍应用的算法。补偿精度虽然很高,但是将以上方法同时用于处理非线性误差和线性误差问题时,自适应能力会变差<sup>[13-15]</sup>。

综上所述,由于神经网络收敛速度慢、容易陷入局部极小点,限制了补偿精度。KF, EKF, UKF自适应能力不强,不能形成一个大的反馈回路。本文提出基于小波变换的递归最小二乘(RLS)分解重构强迫跟踪自反馈模型。本模型不仅对温度漂移进行了相应的补偿,而且对其他的过程噪声进行了抑制,同时加入磁力计和加速度计信息来提高其姿态

估计的精度。第2节系统配置;第3节为基于RLS的小波分解与重构强迫跟踪自反馈模型的建立;第4节利用本算法模型对MEMS陀螺仪动、静态下实验及分析;第5节为实验结论。

## 2 系统配置

本系统使用的IMU为3轴陀螺仪、3轴加速度计与3轴磁力计组合而成<sup>[16]</sup>。本文采用4元数法对3轴陀螺仪和3轴加速度计的数据进行互补式融合处理,3轴磁力计信息辅助解算航向角。传感器性能参数如表1所示。

角度随机游走噪声(ARW),角速度随机游走噪声(RRW),零偏不稳定噪声(BI),速率斜坡噪声(RR)是衡量陀螺仪性能的几个重要参数。实验测试平台分别由航姿参考系统、DSP处理器和IMU测量单元组成。将IMU数据经过DSP进行滤波和姿态解算处理,用航姿参考系统的输出作为基准值进行实验。航姿参考系统的分辨率为 $0.0001^\circ$ ,精度为 $0.01^\circ$ 。航姿参考系统与IMU之间存在着安装误差角,并且为固定常数,经测试后本文对IMU解算出的姿态角做出安装误差角补偿。数据采样频率设置为20 Hz,数据带宽范围设置为256 Hz,加速度计测量范围 $2\text{ g/s}^2$ ,陀螺仪的测量范围 $250^\circ/\text{s}$ 。

## 3 模型建立

FENG等人<sup>[17]</sup>以时域信号分析为出发点,提出了强迫跟踪卡尔曼模型(STKF)对MEMS陀螺仪温漂进行补偿。其修正模型如式(1)所示

$$B_d = a \times T + b \times T' + c \quad (1)$$

其中, $T$ ,  $T'$ 分别为陀螺仪的测量温度和温度的变化率。利用STKF模型对 $a$ ,  $b$ 和 $c$ 3个参数进行实时更新,由于涉及大量的矩阵运算,从而造成了计算量大的问题,同时该模型只对温度造成的漂移进行了补偿,对于其他的过程噪声并没做出补偿,所以提高的精度相当有限。本文提出一种抑制零偏误差

表1 传感器性能参数

	陀螺仪	加速度计	磁力计
测量范围	$\pm 150, \pm 500, \pm 1000, \pm 2000$ ( $^\circ/\text{s}$ )	$\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16$ (g)	$\pm 0.6$ (mT)
噪声密度	$0.01^\circ$ ( $/\text{s}\cdot\sqrt{\text{Hz}}$ )	$110$ ( $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hzrms}}$ )	$48$ ( $\text{nv}/\sqrt{\text{Hz}}$ )
敏感度	$12.5$ mV ( $/^\circ\cdot\text{s}$ )	$1000$ (mV/g)	$0.1$ mV ( $\text{v}\cdot\mu\text{T}$ )
温漂	2%	$-0.3\%$ / $^\circ\text{C}$	$\pm 0.3\%$
采样频率	$0.1\sim 200$ Hz	$0.1\sim 20$ Hz	$0.1\sim 20$ Hz
ARW ( $^\circ/\text{h}^{0.5}$ )	1.57	-	-
RRW ( $^\circ/\text{h}^{1.5}$ )	600	-	-
BI ( $^\circ/\text{h}$ )	224.2	-	-

的算法，对陀螺仪数据进行预处理。计算如式(2)–式(4)所示

$$f(t) = \beta_0 + \beta_1 \cdot t \quad (2)$$

$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})(b_i - \bar{b})}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (3)$$

$$\beta_0 = \bar{b} - \beta_1 \cdot \bar{t} \quad (4)$$

其中， $f(t)$ 输入信号， $\beta_1$ 为输入信号的速率斜坡系数， $\beta_0$ 为常数分量。 $t$ 为采样时间。 $\bar{t}$ 、 $\bar{b}$ 分别是器件采样周期的1/2和零偏不稳定性参数。 $t_i$ 、 $b_i$ 分别是第*i*个采样点的采样时刻和第*i*个采样点计算得到的零偏稳定性误差值。

由于信号的小波系数在不同的尺度上具有很强的相关性，但噪声的小波系数却是弱相关或者不相关的。小波变换对信号去噪有明显的效果，并且含噪信号经过小波变换后的小波系数仍然具有上述特征。递归最小二乘法(RLS)在信号处理领域得到了广泛的应用，该方法对未知参数有优异的追踪能力同时也具有快速收敛的特性<sup>[18]</sup>。因此本文提出基于RLS多重小波变换的强迫跟踪自反馈模型，通过输出误差对输入信号实时反馈来达到强迫跟踪的目的。模型的系统框图如图1所示

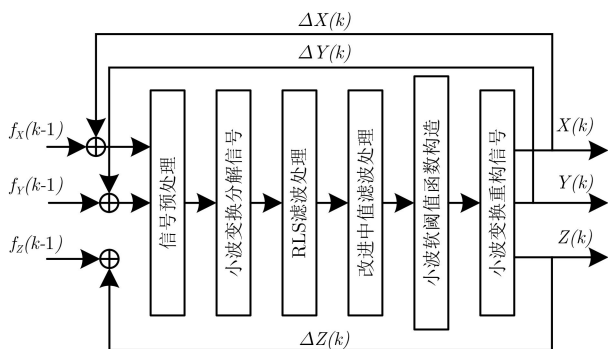


图1 模型的系统框图

小波变换是一种时频的分析方法，采用小波函数逼近原始信号。变换如式(5)所示

$$\begin{aligned} W_f(a, b) &= \int_R f(x) \bar{\Psi}_{a,b}(x) dx \\ &= \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_R f(x) \bar{\Psi}\left(\frac{x-b}{a}\right) dx, \\ (a, b) &\in R, a \neq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

其中， $a$ 、 $b$ 为函数的伸缩变换系数，通过 $a$ 、 $b$ 的不断变化得到一族 $\bar{\Psi}_{a,b}(x)$ (小波基函数)。

小波逆变换公式如式(6)所示

$$f(x) = \frac{1}{C_{\Psi}} \int_R \int_R \frac{W_f(a, b) \bar{\Psi}_{a,b}(x)}{a^2} da db \quad (6)$$

其中， $C_{\Psi} = \int_R \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty$ ， $\hat{\psi}(\omega)$ 是 $\bar{\psi}(x)$ 的傅里叶变换。

对小波函数 $\bar{\psi}_{a,b}(x)$ 中的参数 $a$ 、 $b$ 进行离散化处理，令 $a = 2^j$ ， $b = 2^j k$ ， $(j, k) \in Z$ ，小波函数形式为式(7)所示

$$\bar{\Psi}_{j,k}(x) = 2^{-j/2} \bar{\Psi}(2^{-j}x - k), (j, k) \in Z \quad (7)$$

则 $f(x)$ 的离散小波变换形式如式(8)所示

$$w_f(j, k) = 2^{-j/2} \int_R f(x) \bar{\Psi}(2^{-j}x - k) dx, (j, k) \in Z \quad (8)$$

使用Mallat算法对信号进行分解可以得到的到低频系数 $c_{j,k}$ 和低频系数 $d_{j,k}$ 如式(9)、式(10)所示

$$c_{j,k} = \sum_m h_0(m - 2k) c_{j-1,m} \quad (9)$$

$$d_{j,k} = \sum_m h_1(m - 2k) c_{j-1,m} \quad (10)$$

式(9)、式(10)中 $j=1, 2, \dots, 5$ ， $h_0(n)$ ， $h_1(n)$ 为滤波器系数。文献<sup>[18]</sup>分别给出了用测试集和达到最小值、最大值的顺序，利用不同母小波进行分解合成原信号精度的平均值。本文通过不同的母小波对信号进行不同层的分解与合成，实验发现选择母小波DB函数进行5层分解合成精度可以达到95%的最佳效果。为增加信号的自适应能力对分解后的小波系数利用RLS处理，结果如式(11)所示。将设备处于平稳连续的工作状态，对奇异值采用改进后的中值算法进行处理。

滤波器输出

$$y_{d_i}(k) = \omega(k - 1) \cdot d_j(k) \quad (11)$$

其中， $y_{d_i}(k)$ 的 $d$ 代表高频细节信号， $i$ 代表第*i*层系数。 $\omega$ 是加权系数。对经RLS处理后的数据不排序，所选择的滤波窗口为 $[-n, n]$ ，由于陀螺仪的采样频率为20 Hz，因此将滤波窗口宽度设置为20，输出信号为 $d(k)$ 。利用求平均数的方法实现中值滤波算法，对 $y_{d_i}(k)$ 处理后得到 $Y_{d_i}(k)$ ，如式(12)、式(13)所示

$$d(k) = \frac{1}{2n} \sum_{-n}^n c(k) \quad (12)$$

$$Y_{d_i}(k) = \frac{1}{2n} \sum_{-n}^n (y_{d_i}(k) - d(k)), 0 \leq k \leq \max \quad (13)$$

小波变化分解出的信号都与原信号有一定的相关性，因此求分解出的信号与原信号之间的相关系数为 $R_{d_i}(k)$ ，然后给分解出的信号乘以相应的相关

系数得到重构信号 $f(k)$ ，这样就构成了本文的软阈值的设置。

$$R_{d_j}(k) = E(Y_{d_j}(k) \cdot f(k)) \quad (14)$$

重构信号为

$$f(k) = \sum_{i=0}^{i=5} (R_{d_i}(k) \cdot Y_{d_i} + R_{c_i}(k) \cdot Y_{c_i}(k)) \quad (15)$$

$k+1$ 时刻的输入信号为

$$f(k+1) = f(k) + (f(k+1) - f(k)) \quad (16)$$

## 4 实验及结果分析

### 4.1 零偏稳定抑制试验

使用陀螺仪单轴实验数据利用本文所提出的算法验证对零偏稳定性的抑制效果。图2是利用本文所提零偏补偿算法对陀螺仪数据处理前后的阿伦曲线图。静态下采样数据为269400个。经过计算可知，零偏不稳定性误差比改进前降低了60%。整个阿伦曲线图的形状更加接近理论形状。

### 4.2 静态下数据处理实验

本节是陀螺仪静态下的处理实验，经过3 h的实验所采样数据为60840个。实验分为3个步骤：(1)使用仪器设备采集各轴静态数据；(2)使用传统的小波变换对数据处理并分析；(3)使用改进的小波变换对数据进行处理并分析。图3(a)是 $x$ 轴原始

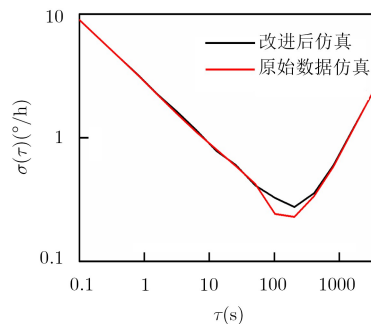


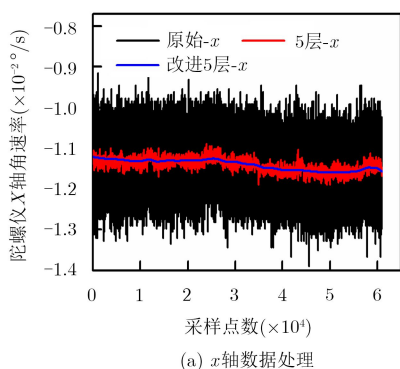
图2 改进前后的阿伦曲线图

数据经过传统5层小波分解重构和改进后的5层小波分解重构后的滤波结果。图3(b)是各自对应的阿伦方差图。

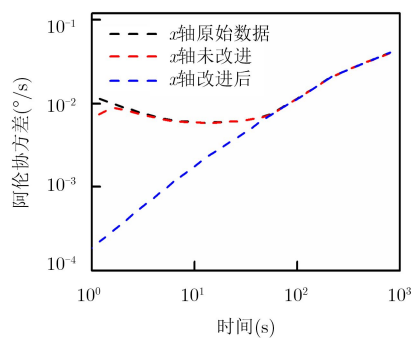
图4(a)是 $y$ 轴原始数据经过传统5层小波分解重构和改进后的5层小波分解重构后的滤波结果。图4(b)是各自对应的阿伦方差图。

图5(a)是 $z$ 轴原始数据经过传统5层小波分解重构和改进后的5层小波分解重构后的滤波结果。图5(b)是各自对应的阿伦方差图。

表2的实验结果表明经过改进后的算法消除了ARW和BI, RRW降低了10倍，速率斜坡噪声降低了1.46倍。以上几个变量所代表种噪声均是MEMS陀螺仪信号的主要噪声源。改进前后算法复杂度基本一致，改进后数据的方差比改进前小。因此，本

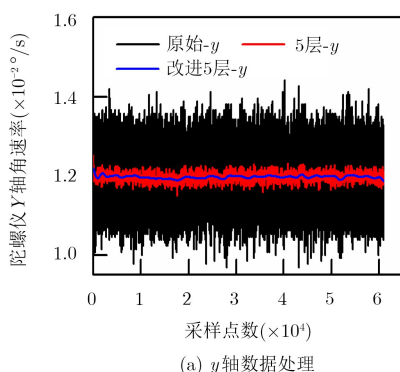


(a)  $x$ 轴数据处理

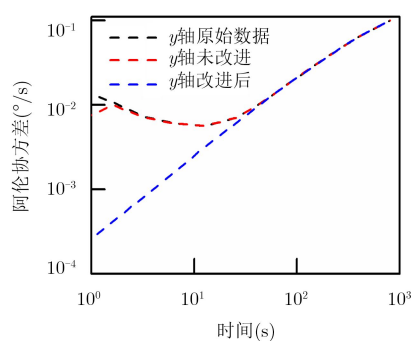


(b)  $x$ 轴阿伦曲线图

图3  $x$ 轴原始数据滤波处理及相应的阿伦方差曲线图



(a)  $y$ 轴数据处理



(b)  $y$ 轴阿伦曲线图

图4  $y$ 轴原始数据滤波处理及相应的阿伦方差曲线图

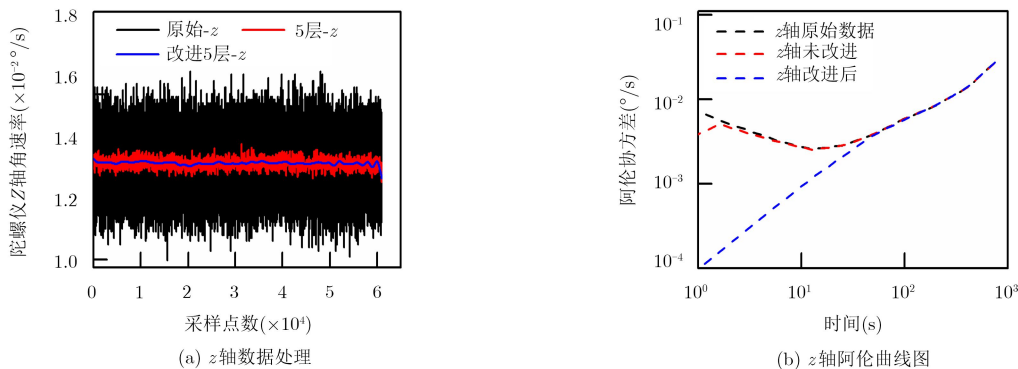


图5 z轴原始数据滤波处理及相应的阿伦方差曲线图

表2 两种小波变换对陀螺仪数据处理结果

算法	坐标轴	运行时间(s)	RMS误差估计	RRW ( $^{\circ}/h^{1.5}$ )	ARW ( $^{\circ}/h^{0.5}$ )	BI ( $^{\circ}/h$ )	RR ( $^{\circ}/h$ )
传统的小波变换	<i>x</i>	26.754976	10.1147	195.2674	0.0301	1.8401	5.3524
	<i>y</i>	28.744975	9.2655	260.4219	0.0283	1.7349	4.5069
	<i>z</i>	27.645963	9.2012	220.3894	0.0117	1.4410	12.7358
改进的小波变换	<i>x</i>	26.85396	0.1290	68.6507	0	0	3.0727
	<i>y</i>	28.64576	0.1249	32.9762	0	0	2.3039
	<i>z</i>	27.69872	0.1247	8.6092	0	0	8.7398

算法模型对MEMS陀螺仪各项噪声均具优异去除抑制功能。

图6是算法改进前后的姿态解算曲线图，从图6中可知静态时改进前后的姿态解算精度最多可提升4°。表3是标准均方误差 (Mean Square Error, MSE)，可见改进后的算法相对于改进前均方误差提升了3个数量级。

### 4.3 动态下数据处理实验

本节为动态下的陀螺仪数据处理实验。将航姿参考系统、数据采集和数据处理设备固定在一起，然后拖动整个系统让其在不同的方向旋转。实验持续7 min采集8000多个数据。

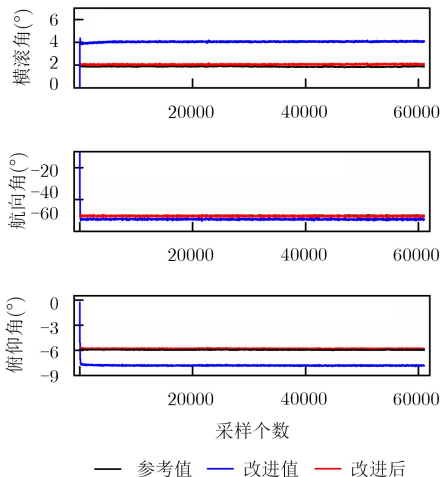


图6 经传统小波变换和改进小波变换处理的姿态角

图7是各轴的角速率经过处理后的结果。图7(a)将采集的*x*轴陀螺仪原始数据经传统的小波变换和改进后的小波变换处理后的结果进行比较。图7(b)是对*y*轴陀螺仪原始数据进行处理。图7(c)是对*z*轴陀螺仪原始数据进行处理。对陀螺仪各轴处理后的误差参数如表4所示。为了对陀螺仪性能做出定量分析，本文利用标准均方误差、平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)、平均相对误差(Average Relative Error, ARE)来衡量算法的性能。同一信号，经过去噪处理后的标准均方误差、平均绝对误差、平均相对误差越小，算法的处理效果越好<sup>[19]</sup>。由表4实验数据可见，标准均方误差降低了25%，平均绝对误差降低了43%，平均相对误差降低了将近3%。改进后的算法计算复杂度基本一致。

图8为姿态角的解算结果包括算法改进前、后的解算结果和航姿参考系统的输出。由图8可见改进后的算法比改进前更具有时实的追踪能力，与航姿参考系统输出数据更加吻合。刘菲等人<sup>[20]</sup>提出利用小波变换与高斯牛顿法相结合建立随机误差参数

表3 姿态解算的MSE误差估计

坐标轴	MSE误差	
	算法改进前	算法改进后
<i>z</i>	$4.3257 \times 10^{-4}$	$1.1512 \times 10^{-7}$
<i>x</i>	$8.7754 \times 10^{-4}$	$8.5849 \times 10^{-7}$
<i>y</i>	$1.5196 \times 10^{-4}$	$8.4663 \times 10^{-5}$

表4 两种算法角速率误差比较数据

算法	坐标轴	MSE (°/s)	运行时间(s)	MAE (°/s)	ARE (%)
传统的小波变换	<i>x</i>	0.0421	7.614595	0.0554	11.10
	<i>y</i>	0.0623	8.130619	0.0796	13.41
	<i>z</i>	0.0976	8.647342	0.0842	15.76
改进的小波变换	<i>x</i>	0.0999	8.467372	0.0236	8.86
	<i>y</i>	0.0043	7.047250	0.0354	10.87
	<i>z</i>	0.0025	8.021335	0.0416	12.52

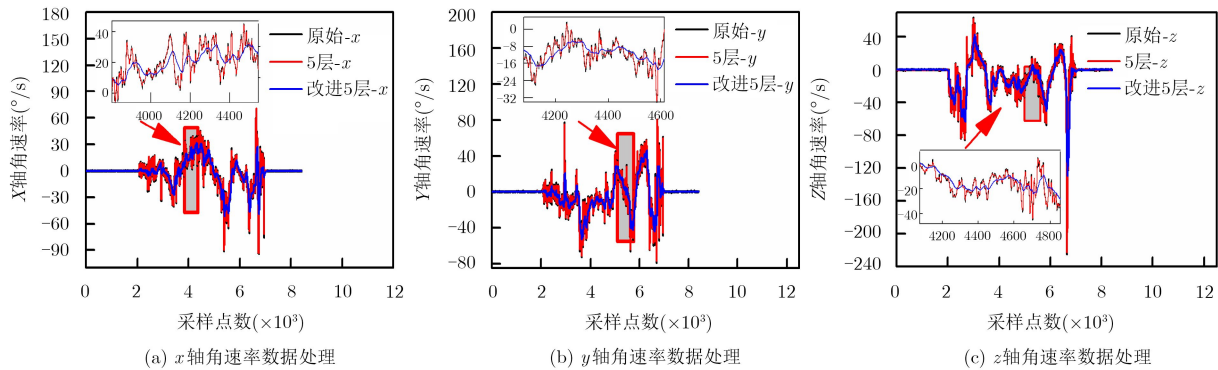


图7 动态下各轴角速率的处理结果

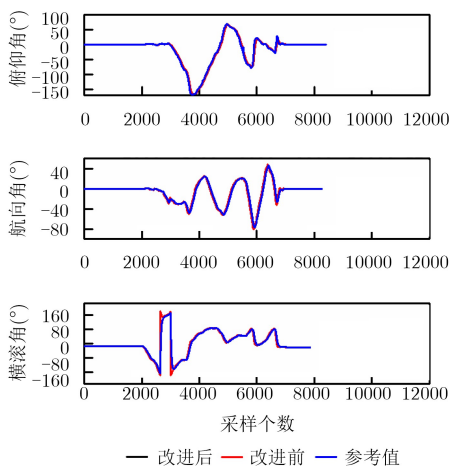


图8 动态下姿态角结算结果

估计模型，对MEMS陀螺仪信号进行去噪处理。表5为本文方法与刘菲等人<sup>[20]</sup>所提出算法，通过姿态角均方误差和平均绝对误差两个参数进行比较。由表

表5 两种算法的姿态角误差参数

算法	姿态角	MSE (°/s)	MAE (°/s)
文献 <sup>[20]</sup> 算法	俯仰角	0.4912	0.4524
	航向角	0.0028	0.1873
	横滚角	0.0020	0.1171
本文算法	俯仰角	0.2928	0.2360
	航向角	0.0021	0.1354
	横滚角	0.0014	0.0816

5可得出本文改进的算法比文献<sup>[20]</sup>的小波变换-高斯牛顿法精度高，其中均方误差至少降低了30%，绝对平均误差至少降低了27%。

### 5 结论

本文对MEMS陀螺信号去噪进行了深入研究，首先提出了基于RLS小波分解重构的强迫跟踪自反馈模型，并对所建模型进行了严格推理，重点研究了本模型在陀螺仪动、静态下的测量精度改善情况。静态情况下采用阿伦方差曲线辨识误差源，并通过计算得出不同误差系数，将两个不同的算法的误差进行了比较，证明传感器性能的提升。动态情况下用数理统计方法说明本文算法在陀螺去噪中的性能提升，同时将本算法解算结果和最新的小波去噪算法以及航姿参考系统输出进行了比较。结果显示本文改进后的方法较改进前和最新的小波去噪算法都有了很大的提升。

### 参考文献

[1] ZHANG Yanshun, PENG Chuang, MOU Dong, *et al.* An adaptive filtering approach based on the dynamic variance model for reducing MEMS gyroscope random error[J]. *Sensors*, 2018, 18(1): 3943–3957. doi: 10.3390/s18113943.

[2] XING Haifeng, CHEN Zhiyong, YANG Haotian, *et al.* Self-alignment MEMS IMU method based on the rotation modulation technique on a swing base[J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 1178–1200. doi: 10.3390/s18041178.

- [3] WANG Wei and CHEN Xiyuan. Application of improved 5th-cubature kalman filter in initial strapdown inertial navigation system alignment for large. misalignment angles[J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 659–676. doi: [10.3390/s18020659](https://doi.org/10.3390/s18020659).
- [4] LI Tao, YUAN Gannan, LI wang, *et al.* Particle filter with novel nonlinear error model for miniature gyroscope based measurement while drilling navigation[J]. *Sensors*, 2016, 16(3): 371–385. doi: [10.3390/s16030371](https://doi.org/10.3390/s16030371).
- [5] GUO Zhanshe, FU Peng, LIU feng, *et al.* Design and FEM simulation for a novel resonant silicon MEMS gyroscope with temperature compensation function[J]. *Microsystem Technologies*, 2018, 24(3): 1453–1459. doi: [10.1007/s00542-017-3524-4](https://doi.org/10.1007/s00542-017-3524-4).
- [6] JON O, AIFONSO B, IBAN L, *et al.* Evaluation of experimental GNSS and 10-DOF MEMS IMU measurements for train positioning[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, 6(5): 1–11. doi: [10.1109/TIM.2018.2838799](https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2838799).
- [7] XIAO Dingbang, XIA Dewei, LI Qingsong, *et al.* A temperature self-calibrating torsional accelerometer with fully differential configuration and integrated reference capacitor[J]. *IEEE Sensors*, 2015, 6(7): 1–4. doi: [10.1109/ICSENS.2015.7370428](https://doi.org/10.1109/ICSENS.2015.7370428).
- [8] IGOR P, BROCK B, CAREY M, *et al.* Towards self-navigating cars using MEMS IMU: Challenges and opportunities[C]. International Symposium on Inertial Sensors and Systems, Moltrasio, Italy, 2018: 1–4.
- [9] 金靖, 王峥, 张忠钢, 等. 基于多元线性回归模型的光纤陀螺温度误差建模[J]. *宇航学报*, 2008, 29(6): 1921–1916. doi: [10.387/s100-1328](https://doi.org/10.387/s100-1328).
- JIN Jing, WANG Zheng, ZHANG Zhonggang, *et al.* Temperature errors modeling for fiber optic gyroscope using multiple linear regression models[J]. *Journal of Aerospace*, 2008, 29(6): 1921–1916. doi: [10.387/s100-1328](https://doi.org/10.387/s100-1328).
- [10] DING Jicheng, ZHANG Qian, HUANG Weiquan, *et al.* Laser gyroscope temperature compensation using modified RBFNN[J]. *Sensors*, 2014, 14(10): 18711–18727. doi: [10.3390/s141018711](https://doi.org/10.3390/s141018711).
- [11] YUAN Guangmin, YUAN Weizheng, LIANG Xue, *et al.* Dynamic performance comparison of two kalman filters for rate signal direct modeling and differencing modeling for combining a MEMS gyroscope array to improve accuracy[J]. *Sensors*, 2015, 15(11): 27590–27610. doi: [10.3390/s151127590](https://doi.org/10.3390/s151127590).
- [12] ZHA Feng, XU Jiangning, LI JingshuHe, *et al.* IUKF neural network modeling for FOG temperature drift[J]. *Beijing Institute of Aerospace Information*, 2013, 24(5): 838–844. doi: [10.1109/JSEE.2013.00097](https://doi.org/10.1109/JSEE.2013.00097).
- [13] ZHI S, JACQUES G, MICHAEL J, *et al.* Low cost two dimension navigation using an augmented Kalman filter/Fast Orthogonal Search module for the integration of reduced inertial sensor system and global positioning[J]. *Elsevier*, 2011, 19(6): 1111–1132. doi: [10.1016/j.trc.2011.01.001](https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.01.001).
- [14] REN Honglian and PETER K. Investigation of attitude tracking using an integrated inertial and magnetic navigation system for hand-held surgical instruments[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, 17(2): 210–217. doi: [10.1109/TMECH.2010.2095504](https://doi.org/10.1109/TMECH.2010.2095504).
- [15] CHEN Xiyuan, XU Yuan, LI Qinghua, *et al.* Application of adaptive extended kalman smoothing on INS/WSN integration system for mobile robot indoors[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 10(10): 1–8. doi: [10.1155/2013/130508](https://doi.org/10.1155/2013/130508).
- [16] CHU Hairong, SUN Tingting, ZHANG Baiqiang, *et al.* Rapid transfer alignment of MEMS SINS based on adaptive incremental kalman filter[J]. *Sensors*, 2017, 17(1): 152–166. doi: [10.3390/s17010152](https://doi.org/10.3390/s17010152).
- [17] FENG Yibo, LI Xisheng, and ZHANG Xiaojuan. An adaptive compensation algorithm for temperature drift of micro-electro-mechanical systems gyroscopes using a strong tracking kalman filter[J]. *Sensors*, 2015, 15(5): 11222–11238. doi: [10.3390/s150511222](https://doi.org/10.3390/s150511222).
- [18] BIRSEL A and BILLUR B. Leg motion classification with artificial neural networks using wavelet-based features of gyroscope signals[J]. *Sensors*, 2011, 11(2): 1721–1743. doi: [10.3390/s110201721](https://doi.org/10.3390/s110201721).
- [19] 李杰, 曲芸, 刘俊, 等. 模平方小波阈值在MEMS陀螺仪在信号降噪总的应用[J]. *中国惯性技术学报*, 2008, 16(4): 236–239. doi: [10.13695/j.cnki.12-1222/o3.2008.02.03](https://doi.org/10.13695/j.cnki.12-1222/o3.2008.02.03).
- LI Jie, QU Yun, LIU Jun, *et al.* Application of modular square wavelet threshold for denoising MEMS-based gyros signal[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2008, 16(4): 236–239. doi: [10.13695/j.cnki.12-1222/o3.2008.02.03](https://doi.org/10.13695/j.cnki.12-1222/o3.2008.02.03).
- [20] 刘菲, 任章, 李青东. 基于小波方差的MEMS IMU随机误差模型间接估计方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2016, 24(1): 77–82. doi: [10.13695/j.cnki.12-1222/o3.2016.01.014](https://doi.org/10.13695/j.cnki.12-1222/o3.2016.01.014).
- LIU Fei, REN Zhang, and LI Qingdong. Indirect estimation method for random error models of MEMS IMU based on wavelet variance[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2016, 24(1): 77–82. doi: [10.13695/j.cnki.12-1222/o3.2016.01.014](https://doi.org/10.13695/j.cnki.12-1222/o3.2016.01.014).

陈光武: 男, 1976年生, 教授, 研究方向为惯导和组合导航.

刘孝博: 男, 1994年生, 硕士, 研究方向为惯性导航、传感器数据处理.

王迪: 男, 1991年生, 硕士, 研究方向为组合导航.

刘射德: 男, 1994年生, 硕士, 研究方向为视觉导航.